

物理チャレンジ 2005

実験問題



2005年8月14日(日)

諸注意・実験器具確認 8:30 ~ 8:40
実験問題へチャレンジ 8:40 ~ 13:20
実験器具後片付け 13:20 ~ 13:30

実験問題へチャレンジを始める前に下記の <注意事項>をよく読むこと。

チャレンジ開始後、次ページ以降に記載の <実験問題の背景> および <実験で使用する部品・装置> を読み、そのうえで、**実験問題1**および**実験問題2**にそれぞれ取り組むこと。

<注意事項>

1. 開始の合図があるまで、問題冊子、解答用紙およびグラフ用紙が入った封筒、実験器具箱を開けてはいけない。
2. 解答用紙およびグラフ用紙のすべてのページ、それに封筒に、チャレンジ番号と氏名を必ず記入すること。
3. 実験結果や計算結果、式の変形など、採点して欲しい事項は解答用紙の所定の場所に記入すること。
4. 持参した筆記用具と、与えられた実験装置、部品、定規、電卓、セロファンテープ以外は使用してはならない。
5. 実験中に部品を壊した場合には、1回だけ新しいものと交換できるので、手をあげて監督者に申し出ること。2回以上同じ部品を壊した場合には、さらに新品と交換できるが、減点となる。
6. チャレンジ開始後から12:00まではチャレンジを終了することはできない。
7. チャレンジ時間中に気分が悪くなったときやトイレに行きたくなったとき、あるいは質問があるとき、チャレンジを終了するときには、手をあげて監督者に知らせること。
8. 終了の合図があれば、チャレンジ番号と氏名が記入されていることを確認の上、解答用紙とグラフ用紙を封筒の中に入れ、机におくこと。その後、実験器具をもと通りに箱に入れること。また、机に貼られたチャレンジ番号と氏名が書かれた紙をはがし、箱に張り付けること。問題冊子は持ち帰ること。

《光の波動性と粒子性に関する実験問題》

< 実験問題の背景 >

物理学は、私たちの身のまわりにあるさまざまな物質の成り立ちや、自然現象を解き明かすことなどを目的とした学問であるが、「光」は物理学の重要な課題の一つである。現在の一般的な理解は、光は波動の一種であり、空間を媒体として伝わっていく電磁波というものである。波長によって「可視光線」、「赤外線」、「紫外線」などという名前で区別している。

このような光の波動性を、実験結果をもとに初めて明らかにしたのがヤング (Young, 1773~1829) である。これ以前の 18 世紀までは、ニュートンの主張を中心とした粒子論の方が優勢な情勢であった。ところが 1804 年に、ヤングは 2 つの穴に光を通したときにできる縞模様の様子を観察し、この現象が 2 つの波が重なり合うことによって生じることを示し、光が波動であることを確固たるものにした。この現象は波の干渉とよばれる。

実験問題 1 で取り組むこのような干渉や回折の他に、屈折や反射と呼ばれる現象も波動に特徴的なものであり、光がこれらの性質を持つことから、ヤング以来 100 年近く、光が波動であるということは疑いのないことだった。**実験問題 1** では、発光ダイオードから放射される光を用い、ヤングが行った干渉現象と類似の回折格子を使った干渉実験を行い、光の波長を測定する。

ところが、19 世紀の終わり頃 (1888 年) になって、光が波動であることだけでは説明できない現象が目立つようになった。この現象は「光電効果」と呼ばれ、金属に紫外線などの光を当てると、金属の表面から金属中の電子が放出される。当時は、そもそも、原子の構造や電子の存在すら明らかになっていなかった時代であり、1897 年に、ようやくトムソン (J. J. Thomson, 1856~1940) によって電子の存在が示され、光については、1900 年に高温の物体から放出される光のスペクトルに関するプランクの理論が発表されている。プランク (Planck, 1858~1947) は実験から得られる光のスペクトルが、一つの理論式で表すことができないという困難な問題を、ある定数を導入することによって解決できることを示した。

さて、光を当てると、なぜ、金属から電子が飛び出てくるのであろうか？ もし、光が波動であるならば、よりまぶしく輝く光を当てれば多くの電子が出てきてよいはずである。ところが、どんなにまぶしく明るい光を当てても電子が出てこないのに、それぞれの金属によって決まったある波長以下の光 (多くは紫外線) ならば、暗くて弱い光でも、たちまち電子の放出を観測することができることがわかってきた。これは、どのような理由なのだろうか？

今からちょうど 100 年前、1905 年の 3 月にアインシュタイン (Einstein, 1879~1955)

が発表した論文の中で、彼は、このような光電効果の特徴を説明するために、光を、ある大きさのエネルギーを持った粒子と考える仮説を提案した。アインシュタインは、光の波動性を否定したわけではない。光は、波動としての性質を持つ一方で、同時に、一定の大きさのエネルギーを持つ粒子であると考えたのである。このような光の粒子を、我々は光量子または光子 (Photon) と呼んでいる。アインシュタインは、ひとつの光子が持つエネルギー (E) が光の振動数 (ν) に比例すると考え、プランクが導入した定数 h (プランク定数と呼ぶ) を用いて、

$$E = h\nu \quad \dots \quad (1)$$

と表した。光電効果において、金属中の電子が光から受け取ることができるエネルギーは常にこの大きさであり、エネルギーの大きさは光の明るさ (光子の数) と無関係である。また、金属中の電子は金属原子に束縛されており、金属の外へ出るためには、この束縛を振り切って離れるだけの十分なエネルギーを得なければならない。これを、その金属の仕事関数 (W) と呼ぶ。もし、光子のエネルギー $h\nu$ が W よりも大きければ、電子は金属外へ $h\nu - W$ の運動エネルギーを持って放出されることになる。仕事関数の大きさは、金属原子の種類によって異なるので、光電効果が生じるぎりぎりの光の振動数 ($h\nu = W$ のときの ν_0) は、金属の種類によって異なる。

こうして、光は、ある波長 (あるいは振動数) を持つ波動であると同時に、 $h\nu$ というエネルギーを持つ粒子でもあると考えられるようになった。波長 λ は振動数 ν を使って

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad \dots \quad (2)$$

と書ける。ただし、 c は光の速さで、およそ $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ である。このような考え方は、やがて電子などにも適用できることが明らかとなり、量子力学というミクロの世界を記述する自然法則が確立された。このように現代物理学の基礎が、アインシュタインにより形作られたのである。

実験問題 2 では、発光ダイオードから放射される光のエネルギー E を測定する。さらに、**実験問題 1** で測定した光の波長から式(2)を使って光の振動数 ν を計算し、それらを組み合わせて、式(1)からプランク定数 h を求める。**実験問題 1** と**実験問題 2** を通して、光の波動性と粒子性という二重性を理解したい。

<実験で使用する部品・装置>

(1) 簡易分光器 (図1)

回折格子による光の干渉現象を利用して光の波長を求めるときに使う実験装置である。長方形の金属製の箱の両側に、スリットと回折格子(グレーティングとも言う)やCDを貼り付ける孔が開けられている。スリットの下には、スペクトルの各色がスリットの位置からどれくらい離れたところに見えるのか、その距離を測定するための工夫として、細長い孔(マーカ―)の開いたスライド板

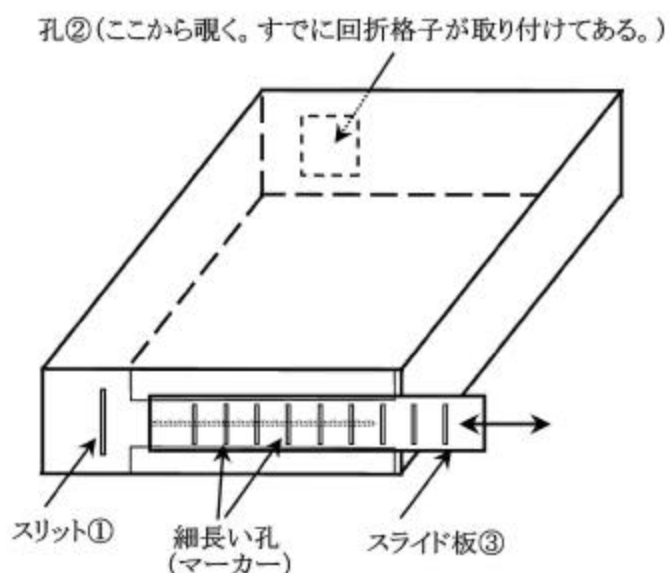


図1. 簡易分光器

が取り付けられている。孔に貼り付けられている回折格子をすかして箱の中を覗き、スリットを通して室内の照明灯や発光ダイオード、豆電球などを見ると、スライド板のある箱の内側側面にスペクトルが観察される。スライド板を手で動かし、スペクトルの目的とする位置にスライド板の細長い孔(マーカ―)を合わせ、スリットとその細長い孔(マーカ―)との距離を、箱の外から定規で測定する。(注)孔を覗く際、眼鏡や眼を傷つけないように十分注意すること。

(2) 発光ダイオード・豆電球の点灯装置 (図2)

電池ホルダーに単3電池4個を正しく入れ、出力電圧調節ツマミを回すことによって、クリップ端子の出力電圧を0~6Vの間で連続的に変化させることができる。クリップ端子の赤色がプラス、黒色がマイナスである。このクリップ端子を発光ダイオードや豆電球の電極棒につないで点

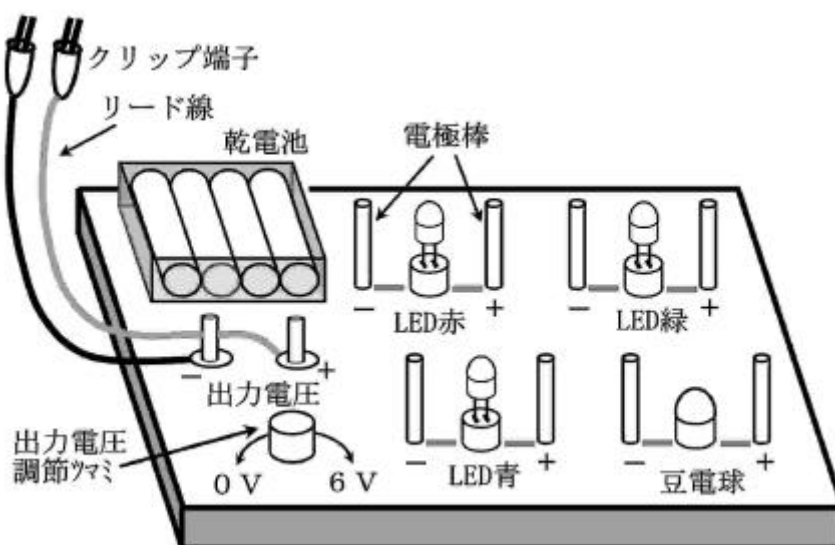


図2. 発光ダイオード・豆電球の点灯装置

灯させる。接続の際，プラスとマイナスの極性を間違えないように注意すること。また，発光ダイオードは大きな電圧をかけると非常にまぶしく輝くので，眼の保護のため，長時間にわたって注視しないこと。

(3) 発光ダイオード(LED)(図3)

端子間に電圧を加えることによって発光させることができる素子である。豆電球と異なり，端子を電池につなぐとき極性に注意する必要がある。端子の長い方をプラス，短い方の端子をマイナスに接続する。図2の点灯装置のソケットに極性を間違えないように差し込み，電極棒に記された極性どおりにリード線を接続すること。点灯装置には発光ダイオードが取り付けられていないので，各自で取り付けること。なお，発光ダイオードを破損したときには，発光ダイオードのソケットから引き抜き，添付の予備の発光ダイオードに交換する。また，発光ダイオードに十分大きな電圧を加えると，大変まぶしく発光するが寿命が短くなるので，この状態で長時間放置しないこと。また，まぶしく輝いている状態の発光ダイオードを長い時間にわたって注視しないこと。

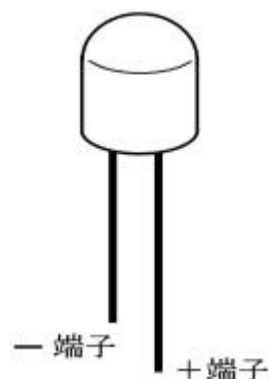


図3 . 発光ダイオード(LED)

(4) デジタル・マルチテスター(図4)

(実験問題1 では使用しない)

デジタル・マルチテスターは，直流電流や直流電圧，交流電圧，電気抵抗などを測定するために用いる。マルチテスター用の黒のリード線を下部中央のCOM と書かれたジャックに差し込み，赤のリード線を下部右の V mA と書かれたジャックに差し込む。次に，中央のダイヤル(ロータリースイッチ) を，測定をおこなう位置にセットして測定回路に組み込んで使用する。測定レンジごとに最大電流値や最大電圧値が定められているので，それ以上の電流や電圧が加わらないように注意すること。特に，200 mA 以下のレンジで直流電流を測定する際，200 mA 以上の電流を流すと内部の保護ヒューズが切れてしまい，測定できなくなるので注意すること。ヒューズが切れたと考えられる場合には，監督者に申し出ること。なお，ヒューズが切れた場合には，1 回だけ新しいものと交換できる。2 回以上交換はできるが，減点対象となる。また，ホールドボタンは押さないこと(もし押してしまった場合は，もう一度押せば，それが解除できる)。今回の実験で電圧計として使用する場合は，2 V レンジか 20 V レンジを使用



図4 . デジタル・マルチテスター

する。直流電流計として使用する場合は，2 mA レンジか 20 mA レンジを使用する。

図5に示すように，デジタル・マルチテスターを電圧計として用いるときは，電圧を測定しようとする素子（発光ダイオードや豆電球）と並列に接続し，電流を測定する場合には直列に接続する。

注1： ロータリースイッチを電流計にしたまま，測定しようとする素子に並列につないでしまうと，デジタル・マルチテスターに過電流が流れて，内部ヒューズが瞬時に切れるので十分注意すること。

注2： デジタル・マルチテスターが電池切れの場合には，ディスプレイ左下にバッテリーマークが表示され，正しい測定ができなくなるので，その場合は監督者に申し出ること。

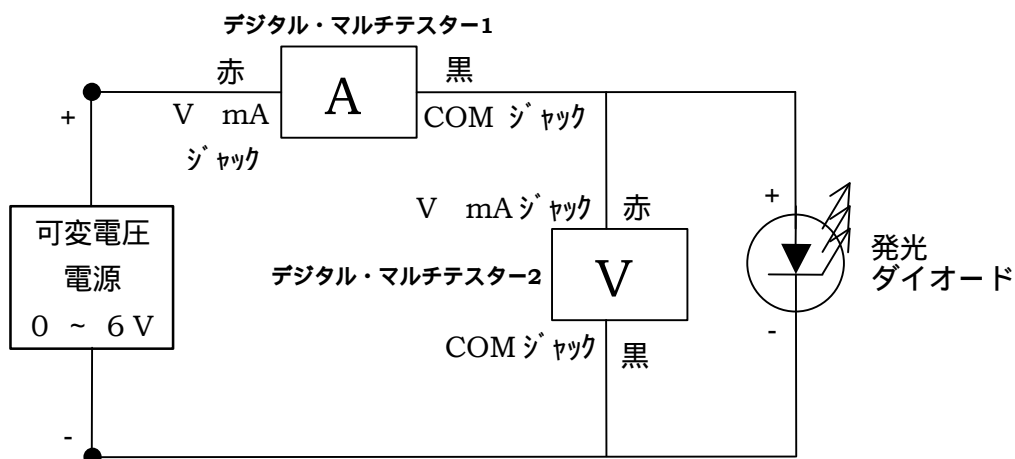


図5 . デジタル・マルチテスターの接続の仕方

実験問題 1

実験の目的： 回折格子による光の干渉を利用して，赤色，緑色，青色それぞれの発光ダイオードが発する光の波長を求める。また，CDを回折格子として用い，CDのトラックピッチを算出する。

実験の原理： たとえば，図6のように回折格子にレーザー光を垂直に当てると，スクリーン上に明るい点が幾つも並ぶ。回折格子には1mm中に数百本の割合で細かい溝が等間隔で刻み込まれていて，溝の部分にあたった光はさまざまな方向に散乱されるが，溝と溝の間の平面の部分にあたった光はスリットのように通り抜ける。そのため，通り抜けた光どうしの干渉が起こる。この場合，スクリーンまでの距離 l に比べて回折格子の平面部分の間隔 d は非常に

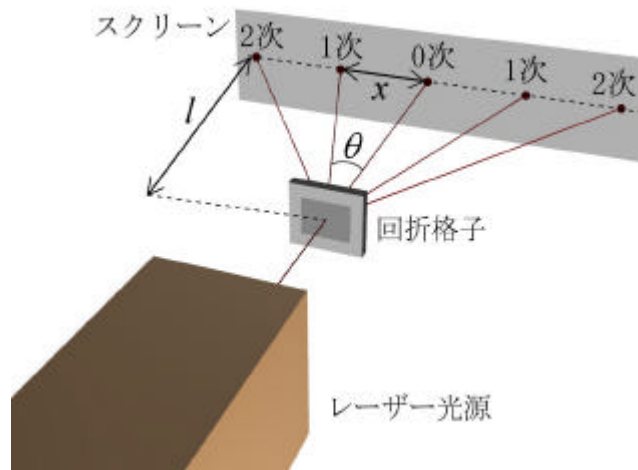


図6．回折格子による干渉実験

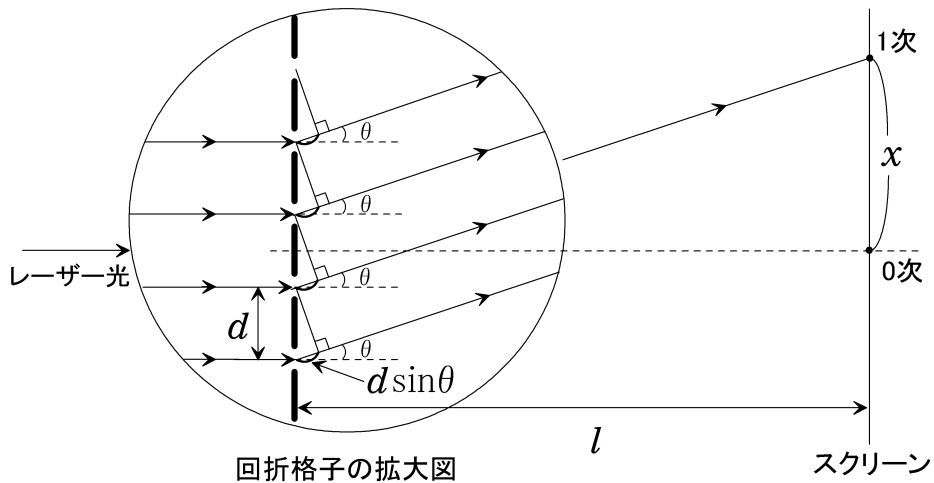


図7．回折格子を通過する光路の拡大図

小さいため，光路を平行とみなすことができる。図7に回折格子を通過する光路の拡大図を示す。スクリーン上の点（中心からの距離が x の点）が明るくなるのは，隣り合う平面部分から通りぬけた光の光路差 $d \sin \theta$ が光の波長 λ の整数倍のときで，

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad \dots \dots (3)$$

である。これに、 $\sin \theta = \frac{x}{\sqrt{l^2 + x^2}}$ を代入すると、

$$\frac{xd}{\sqrt{l^2 + x^2}} = ml \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad \dots \dots (4)$$

が得られる。

これと同じ原理で、図 1 に示した簡易分光器を使い、図 8 のように回折格子とスリットを通して発光ダイオードを観察すると、回折光のスペクトルを観測できる。図 8 で、回折光が強め合っただけでスペクトルが見えるための条件を、 L, x, d, λ, m (m は整数) を用いて表すと

$$\frac{xd}{\sqrt{L^2 + x^2}} = m\lambda \quad \dots \dots (5)$$

と表せる。ただし、 λ は明るく見える光 (スペクトル) の波長であり、この実験では $m=1$ のスペクトル (1 次回折光) を測定することになる。

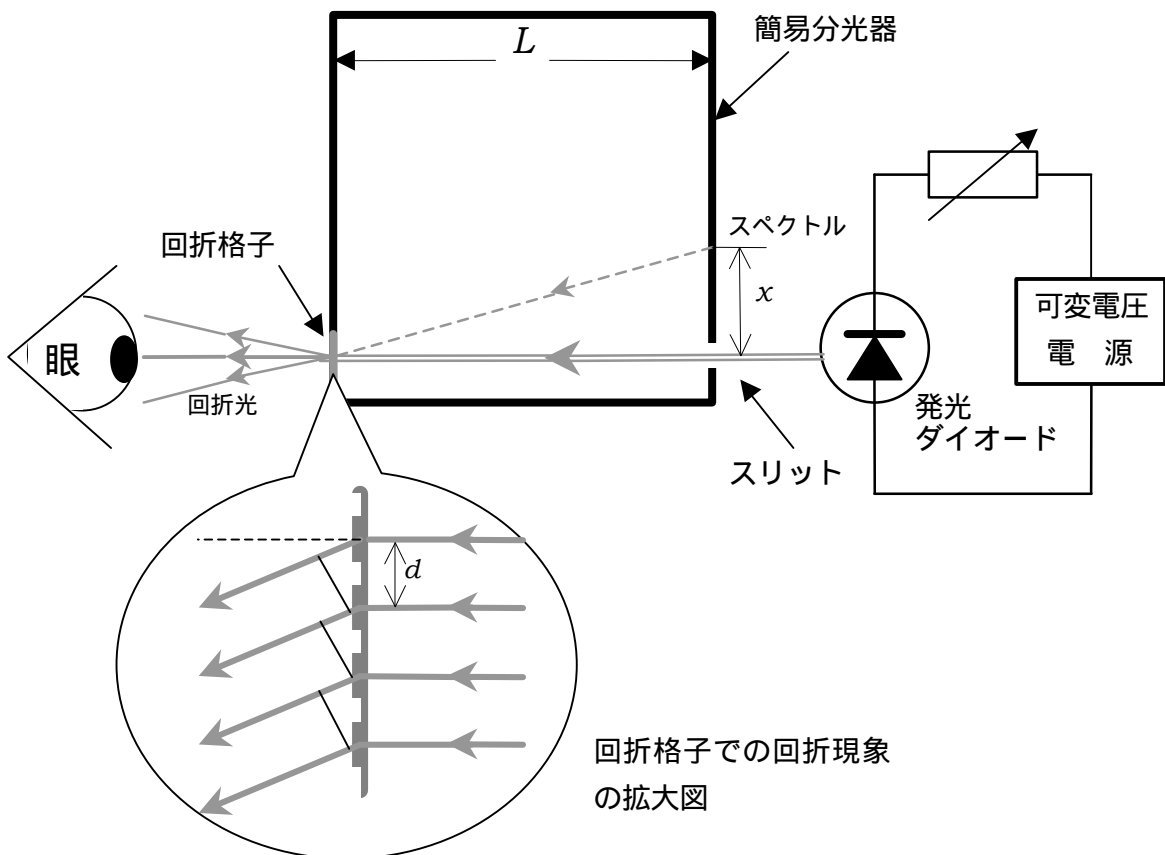


図 8 . 簡易分光器による干渉縞

実験の準備：

図 8 に示す簡易分光器に透過型回折格子（格子定数 $d = 2.00 \times 10^{-6} \text{ m}$ ）のフィルムがセロテープで取り付けてあるので，それを確認する。

回折格子を通してスリットから室内の照明灯の光を見て，箱の中のスリットの下部にスペクトルが見えることを確認する。スライド板をスライドさせて，移動する小孔から漏れる光をマーカーとして用いる。

発光ダイオード・豆電球の点灯装置の出力電圧調節つまみを 0 V にしておく。電池を電池ホルダーに正しい向きで入れる。出力電圧リード線のクリップ端子を赤色発光ダイオードの電極棒に接続する。その際，極性に注意する。最後に出力電圧つまみを徐々にまわして発光ダイオードが点灯することを確認する。

同じ手順で，緑色と青色の発光ダイオードも点灯することを確認する。

実験問題 1-1 発光ダイオードの出す各色の波長の測定

簡易分光器を用いて，赤色，緑色，青色の各発光ダイオードが発する光の波長を測定する。

問 1 まず，赤色の発光ダイオードを点灯させ，スライド板をスライドさせてマーカーを赤色のスペクトルの中心に一致させる。次に，そのマーカーからスリットまでの距離 x を，簡易分光器箱の外側で定規を使って測定し，測定結果をメートル単位で解答用紙に記入しなさい。同じ要領で緑色と青色の発光ダイオードについても測定し，測定結果を解答用紙に記入しなさい。なお，測定に際し，緑色の発光ダイオードおよび青色の発光ダイオードでは，それぞれ緑色および青色スペクトルの中心位置を測定すること。

問 2 問 1 の測定結果と式(5)を用いて，それぞれのダイオードが発する光の波長を計算し，その結果をメートル単位で解答用紙に記入しなさい。

問 3 回折格子を使って光の波長を測定する実験で，測定精度を向上させるためには，どのような工夫を行えばよいか。簡潔に書きなさい。

実験問題 1-2 CD (コンパクトディスク) のトラックピッチの測定

CD に白色光を当てると反射光が色づいて見える。これは，図 9 に示すように，CD には渦巻状にトラックと呼ばれる溝があり，トラックの間隔（トラックピッチ）は一定のため，回折格子と類似の働きをするからである（図 9 は模式図であり，実

際のトラック幅はもっと狭い)。CDは透明な樹脂でできており、溝の上に金属光沢フィルムや保護層など(レーベル面と呼ばれる)が貼り付けてある。

作業 1 実験器具箱のなかに入っているCDのレーベル面には、カッターですでに傷を付けてある。その上にセロテープをしっかりと貼り、一気にセロテープをはがすと金属フィルムから上の部分が一緒にはがれて透明になる。レーベル面がはがれた後の、溝の残った透明なディスク部分を回折格子として実験に使う。

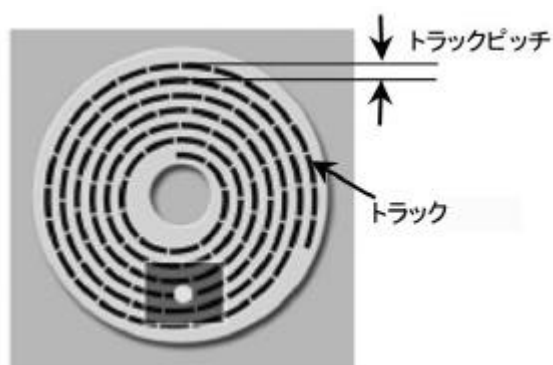


図9 . CD のトラックとトラックピッチ

作業 2 簡易分光器の回折格子を取り去り、その代わりに**作業 1**で作った透明なCDをトラックの向きに注意してセロテープで取り付けなさい。

問 4 青色の発光ダイオードを用い、**実験問題 1-1**と同じ要領でスペクトルの中心位置 x を求め、この測定結果と**問 2**で得られた青色発光ダイオードの波長を用いて、CDのトラックピッチをメートル単位で算出なさい。

問 5 CDの代わりに記憶容量の多いDVDを使ったら、スペクトルはどのように観察されるか。その理由とともに簡潔に述べなさい。

実験問題 2

実験の目的： 光が h というエネルギーを持つことを，発光ダイオードの電流・電圧特性曲線を用いて調べ，**実験問題 1** で得られた波長の値と合わせて，プランク定数 h の値を求める。

実験の原理： 発光ダイオードは半導体と呼ばれる物質で作られている。電流を流すことができるかどうかという観点で見ると，我々の身の回りには，電流が流れやすい金属と，流すことのできない絶縁体と，さらにこの中間の性質を持った半導体の3つに大きく区別することができる。電流は一般的には電子の移動であるが，この電子はすべての原子が持っている。しかし，それぞれの原子の中で電子がどのようなエネルギー状態にあるか，電流として移動できる状態にあるかどうか，3つの区別の原因になっている。このような物質の結晶中での電子のエネルギー状態を，下図のように簡単に表すことができる。

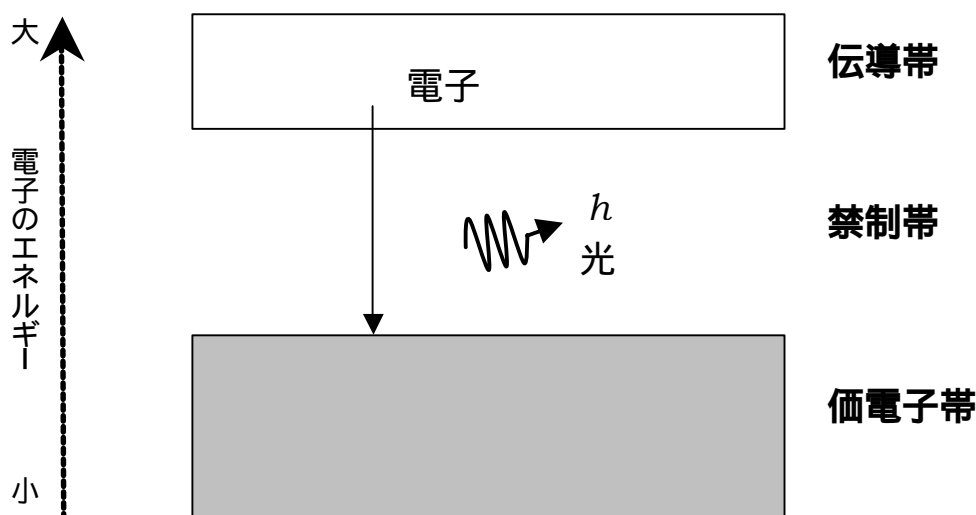


図 10 . 固体結晶の中での電子のエネルギー状態

結晶を作っている原子が持っている電子の多くは価電子帯と呼ばれるエネルギーの低い状態にある。この状態よりも高いエネルギー状態は，伝導帯と呼ばれているが，価電子帯と伝導帯の間には，電子が存在することのできない禁制帯と呼ばれる部分がある。エネルギーの高い伝導帯に電子が入ると，物質に電流が流れることができる。

発光ダイオードは，電池のエネルギーで価電子帯の電子を上部の伝導帯にくみ上げ，電子がここから価電子帯に落ちるときのエネルギー差を，光のエネルギーとして放射している。禁制帯の幅は，発光ダイオードを作る半導体の種類で変えることができるし，光のエネルギーは振動数によって決まっているため，禁制帯の幅を調節することで，色々な振動数(または波長)の光を発する発光ダイオードを作ることが可能である。

電圧が V の電池で電子をくみ上げるとき，電子が持つエネルギー E は電気素量を e とすると， $E = eV$ とあらわすことができる。このエネルギーが，禁制帯を越えるのに必要

最小のエネルギー eV_0 より大きくなると、つまり、 V_0 以上の電圧をかけるとダイオードに急激に電流が流れて発光し始める。電子が価電子帯に戻るときには、このエネルギーが光のエネルギーになるので、発光ダイオードから出てくる光のエネルギーは、

$$E = h\nu = eV_0 \quad \dots\dots (6)$$

という式を満たしている。

実験の準備： 発光ダイオードの点灯装置に、デジタル・マルチテスターを図5にあるように、一つを直流電流計、もう一つを直流電圧計として接続する。出力電圧調節つまみを回し、デジタル・マルチテスターの電圧および電流の数値が表示され、それらが変化することを確認する。その際、デジタル・マルチテスターが電池切れの場合には、ディスプレイ左下にバッテリーマークが表示されていないか確認する（バッテリーマークが表示されている場合は監督者に申し出ること）。また、200 mA 以上の電流を流すとテスターのなかのヒューズが切れるので注意すること（ヒューズが切れた場合にも監督者に申し出ること）。

実験問題 2-1

問1 実験問題 1-1 の問2で求めた各ダイオードの光の波長 から式(2)を使って光の振動数 を計算し、ヘルツ単位で解答用紙に答えなさい。ただし、光速 $c = 3.00 \times 10^8$ m/s とする。

問2 次に、各ダイオードに加わる電圧を徐々に増加させ、わずかに点灯し始めるときの電圧 V_0 を求めよ。その V_0 からエネルギー $E = eV_0$ を計算し、ジュール単位で解答用紙に答えなさい。ただし、電気素量 $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C とする。

問3 それぞれのダイオードについて、 E を縦軸に、光の振動数 を横軸にとり、別紙グラフ用紙(1)上に点をプロットしなさい。これらの点を直線近似して得られる直線をひき、その傾きから、式(6)を用いてプランク定数 h を求めなさい。単位も忘れずにつけること。

問4 各発光ダイオードについて、発光ダイオードに加える電圧と発光ダイオードに流れる電流の大きさを測定する。ただし、20 mA を超えないように測定すること。電圧の測定にはマルチテスターの2 V または 20 V レンジを使用し、電流の測定には2 mA または 20 mA レンジを使用すること。測定結果は、解答用紙の表に記入し、この表をもとに、各ダイオードの電圧と電流の関係を表すグラフを、別紙グラフ用紙(2)および(3)に描きなさい。ただし、赤色、緑色、青色の各発光ダイオードのデータ(3種類)を1つのグラフにまとめて描きなさい(この各曲線は、各発光ダイオードの電流・電圧特性曲線と呼ばれる)。グラフは、方眼紙(別紙グラフ用紙(2))および片対数グラフ用紙(別紙グラフ用紙(3))の両方に描きなさい。各グラフ用紙に指定されている電流・電圧の範囲内のデータ点だけをプロットすればよい。

(注意)

- ・測定では、出力電圧調節ツマミをまわす際、ツマミをゆっくりとまわし、0 V から徐々に電圧を増加させていくこと。
- ・測定する電圧の間隔は、測定を行いながらグラフを描いて、各自で判断すること
- ・測定範囲に対応するデジタル・マルチテスターのレンジの切り替えを、適切に行なうこと（不適切なレンジで測定すると、ヒューズが切れてヒューズの交換が必要になる場合がある）

問5 問2で求めた V_0 は測定には個人差があるうえに、そもそもダイオードの性質として V_0 を特定するのは困難である。そこで、問4で求めた電流・電圧特性曲線を利用してプランク定数を求める。問4で描いた緑色ダイオードと青色ダイオードの電流・電圧特性曲線は、赤色ダイオードの電流・電圧特性曲線を横方向に平行移動するとほぼ重なることがわかる。このことから、電流値 0.1 mA における電圧を V_0 と定義し、それぞれのダイオードの V_0 を片対数グラフから読み取りなさい。その V_0 から計算した $E = eV_0$ を縦軸に、それぞれの発光ダイオードから出る光の振動数 ν を横軸にとり、別紙グラフ用紙(4)上に点をプロットしなさい。これらの点を直線近似して得られる直線をひき、その傾きからプランク定数 h を求めよ。

問6 発光ダイオードの場合と同様に、豆電球についても、電圧と電流の関係を求めて表とグラフ(別紙グラフ用紙(5))を完成させなさい。この測定では、電圧測定レンジを 20 V、電流測定レンジを 200 mA に設定しなさい。また、豆電球の電流・電圧特性曲線と発光ダイオードの電流・電圧特性曲線とを比較し、なぜ曲線の形が異なるか、その理由を考察して書きなさい。さらに、発光ダイオードと比べて消費電力の違いを考察せよ。

ここまでの測定が終了したら、いったんすべての回路の接続をはずしなさい。

実験問題 2-2

赤色発光ダイオードの2つの電極棒に、1台のデジタル・マルチテスターを直流電圧計(200 mV レンジ)にして、直接接続しなさい。

問7 赤色発光ダイオードに室内照明光が当たると、ダイオードの端子間に電圧(起電力)が発生することを確認し、その値を解答用紙に記入しなさい。手でダイオードに当たる光をさえぎると、起電力が低下することも確認しなさい。このように、発光ダイオードに光が当たると起電力が発生する理由を考察して書きなさい。

問8 問7と同様のことを、緑色ダイオードと青色ダイオードについても行い、生じる起電力の大きさを赤色ダイオードと比較しなさい。なぜ、起電力の大きさが異なるのか、その理由を考察して書きなさい。